Transports Canada
Transport Canada

Développement
Development

TP 7361F

Un moteur expérimental Ringbom–Stirling

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

par le
Département de génie mécanique
Université de Calgary

MARS 1986

Canada

CA1
DTC 801
86
E867Z
c.2

88-03195/

TP 7361F

CA1
DTC 801
S
E867Z
c.2

UN MOTEUR EXPÉRIMENTAL RINGBOM-STIRLING

Library and Information Centre / Centre de Documentation (CGLA)
RECEIVED - REÇU LIE
MAR 10 1988
Transport Canada / Transports Canada

par

G. Walker
O.R. Fauvel

Département de génie mécanique
Université de Calgary

Mars 1986

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles du contractant et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title: "An Experimental Ringbom-Stirling Engine", TP 7361E.

Transports Canada / Transport Canada

Développement / Development

FORMULE DOCUMENTAIRE DU RAPPORT

1 N° du rapport Transports Canada TP 7361F	2 N° de l'étude — CDT 4427, 4428, 4430	3 N° de catalogue du destinataire
4 Titre et sous-titre Un moteur expérimental Ringbom-Stirling		5 Date du rapport Mars 1986 6 N° du rapport de l'organisme exécutant 69-5415
7 Auteur(s) Dr. Graham Walker et Dr. Owen R. Fauvel		8 N° de dossier Transports Canada D 1465-345-1
9 Nom et adresse de l'organisme exécutant Department of Mechanical Engineering University of Calgary Calgary (Alberta) T2N 1N4		10 N° de dossier — ASC 09SDT 8200-1-1509 11 N° de contrat — ASC ou Transports Canada
12 Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy-Favreau, 200 ouest, boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montréal (Québec) H2Z 1X4		13 Genre de rapport et période visée Sommaire 14 Code de l'organisme parrain CDT-4427/28/30
15 Remarques additionnelles Sommaire de "An Experimental Ringbom-Stirling Engine", TP 6596E.		16 Agent de projet — CDT Richard Dillon

17 Resumé

Un moteur Ringbom-Stirling devant servir à démontrer le principe en jeu, et réalisé en modifiant un moteur diesel de fabrication courante, a été essayé; il a utilisé l'air comme fluide de travail et l'eau comme lubrifiant. Sa réalisation fait partie d'une étude s'intéressant aux gros moteurs à cycle de Stirling chauffés au charbon et destinés à la propulsion de locomotives, de navires, de véhicules hors routes ainsi qu'à la production d'énergie et à diverses autres applications minières, agricoles, forestières, etc.

Le cycle Ringbom-Stirling ouvre la perspective d'une conversion graduelle des moteurs actuels à combustion interne en moteurs à combustion externe brûlant du charbon, ce qui éviterait leur remplacement intégral.

Ce moteur expérimental n'a pas été essayé dans les conditions normales de vitesses et de pressions, pour des raisons de sécurité. Mais les résultats ont montré que le rendement attendu aurait pu être atteint si les vitesses et les pressions mises en oeuvre avaient été normales, au lieu d'être réduites comme cela fut le cas.

Un programme de simulation assistée par ordinateur, mis au point en cours de route, a été utilisé pour vérifier l'effet des variations dans les paramètres de base. C'est ainsi qu'a été mise en évidence l'importance de la masse du déplaceur dans le rendement d'un moteur à vitesse variable. Ces travaux ont débouché sur un modèle nouveau de moteur Ringbom-Stirling disposant d'un entraînement séparé pour le déplaceur.

18 Mots-clés Moteur à cycle de Stirling, moteur Ringbom de traction ferroviaire, charbon.	19 Diffusion Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20 Classification de sécurité (de ce rapport) non classifié	21 Classification de sécurité (de cette page) non classifiée	22 Nombre de pages v, 26	23 Prix -

CDT TDC 79-005 Rev 86

Canada

Transport Canada / Transports Canada
Development / Développement

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 7361F	4427, 4428, 4430	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Un moteur expérimental Ringbom-Stirling	March 1986
	6. Performing Organization Report No. 69-5415

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
Dr. Graham Walker and Dr. Owen R. Fauvel	D 1465-345-1

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Department of Mechanical Engineering University of Calgary Calgary, Alberta T2N 1N4	09SDT 8200-1-1509
	11. DSS or Transport Canada Contract No

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex, 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	Summary
	14. Sponsoring Agency Code TDC-4427/28/30

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Summary report of "An Experimental Ringbom-Stirling Engine", TP 6596E.	Richard Dillon

17. Abstract

A proof of-principle Ringbom-Stirling engine built using parts from a commercially available diesel engine has been demonstrated. The engine used air as the working fluid and water as the lubricant. It was developed as part of a wider study concerned with large coal-burning Stirling engines for use in railway locomotives, ships, off-highway vehicles for mining, construction, agriculture, forestry and for stationary power.

Conversion of diesel engines to Ringbom-Stirling engines offers the prospect of gradual conversion to coal-burning operation rather than direct replacement by new equipment.

The experimental engine was not tested under the design conditions of speed and pressure because of safety concerns. The results achieved at low pressures and speeds indicate that design output would probably be achieved at the design conditions.

A computer simulation program developed during the work was used to perform parametric studies of the effects of change in the principal design parameters. This study revealed the significance of the mass of the displacer in the proper operation of a Ringbom engine including speed control. An important consequence was the concept for a new type of Ringbom-Stirling engine with independent displacer drive.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Stirling engine, Ringbom-locomotive engine, coal-fired.	Limited number of copies available upon request from sponsoring agency.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	v, 26	-

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	DESCRIPTION DU MOTEUR	6
	2.1 Généralités	6
3.	ESSAIS PRÉLIMINAIRES	11
	3.1 Généralités	11
	3.2 Résultats	11
	3.3 Analyse des données	12
4.	OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS	18
5.	BIBLIOGRAPHIE	26

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU

Figure 1	Moteur diesel Lister 8/1	9
Figure 2	Coupe du moteur Ringbom-Stirling	10
Figure 3	Puissance délivrée en fonction du régime et de la pression moyenne du cycle	17
Tableau 1	Compilation des résultats, partie 1	14
	Compilation des résultats, partie 2	15
	Compilation des résultats, partie 3	16

1. INTRODUCTION

Le moteur Stirling est un moteur à combustion externe convertissant une partie de l'énergie thermique qu'il reçoit en travail et rejetant le reste comme chaleur perdue à une température proche de la température ambiante.

La chaleur nécessaire au fonctionnement du moteur peut venir de sources variées: combustibles solides ou liquides, énergie solaire et même éléments radioactifs. À cet égard, le moteur à cycle de Stirling s'apparente au moteur à cycle de Rankine (machine à vapeur), et l'un comme l'autre, chauffé au charbon, pourrait remplacer les moteurs diesel actuels.

Ce qui les distingue l'un de l'autre, c'est leur cycle thermodynamique respectif. Dans le cycle de Rankine, le fluide de travail passe par un cycle d'évaporation et de condensation, si bien que les températures maximales et minimales de même que les pressions maximales et minimales correspondantes sont caractéristiquement liées. Il en résulte une machine encombrante et lourde formée d'une chaudière, d'un condenseur, d'un moteur à capsulisme ou d'une turbine entraînée par la détente du fluide chaud ainsi que d'organes auxiliaires, mais dont le rendement thermodynamique est élevé: 40 p. 100. Sans condenseur, le moteur est allégé et plus petit; toutefois, son rendement tombe à 10 p. 100.

Dans le moteur Stirling, c'est un gaz enfermé à l'intérieur qui engendre le travail mécanique. De ce fait, les niveaux de pression et de température peuvent être déterminés indépendamment les uns des autres. De plus, il incorpore un récupérateur de chaleur, ou régénérateur, qui restitue une partie élevée de l'énergie thermique produite. En conséquence, il est possible de concevoir un moteur Stirling brûlant du charbon, ayant un encombrement et un poids réduits et donnant un rendement thermodynamique de 30 à 35 p. 100.

Les moteurs à cycle de Rankine et à cycle de Stirling peuvent bien sûr brûler des combustibles liquides; ils ne pourront cependant jamais concurrencer l'économie et le rendement d'un moteur à combustion interne brûlant du mazout. Tant que ce combustible restera disponible, la machine la plus économique sera le moteur diesel. Mais force est de constater que le charbon est le plus répandu des combustibles fossiles, et la prudence veut que l'on ménage l'avenir en envisageant dès maintenant des

combustibles de relève susceptibles de remplacer les produits pétroliers.

Dans cette optique, Walker (1981a)* a étudié la possibilité d'utiliser le moteur Stirling pour la traction ferroviaire dans le contexte particulier du Canada. Le rapport rendant compte de cette recherche constitue un ouvrage qui fait autorité dans le domaine considéré. Un rapport récapitulatif en a été tiré par Walker et associés (1982).

Dans son rapport sur l'utilisation du moteur Stirling pour la traction ferroviaire, Walker propose un moteur Ringbom-Stirling novateur utilisant l'air comme fluide de travail et l'eau comme lubrifiant. Poussant plus loin, l'auteur lance l'idée que les locomotives diesel d'utilisation courante pourraient être converties au cycle de Stirling tout en gardant une bonne partie de leurs composants et organes. Ainsi, il serait possible de réaliser de très fortes économies en convertissant graduellement les locomotives diesel existantes en locomotives brûlant du charbon, plutôt que de les remplacer carrément par des locomotives à vapeur. Comme source de chaleur pour ces moteurs diesel convertis en moteurs Ringbom-Stirling, on utiliserait la combustion du charbon sur lit fluidisé et les puissances thermiques engendrées seraient transmises par des caloducs au sodium.

Enfin, ce même rapport recommandait la mise sur pied d'un programme de recherche pour la validation du moteur Ringbom-Stirling obtenu par conversion d'un moteur diesel. C'est le résultat de cette recherche dont il est rendu compte ici.

Un moteur à cycle de Stirling comporte essentiellement deux enceintes qui sont maintenues à des températures différentes, et dont le volume subit des variations périodiques tout en restant décalées l'une par rapport à l'autre de 90°, environ. L'enceinte chaude, ou enceinte de détente, communique avec l'enceinte froide, ou enceinte de compression, à travers trois échangeurs de chaleur: le réchauffeur, le régénérateur et le refroidisseur. Un moteur Ringbom-Stirling est un cas particulier, caractérisé par un déplaceur à course libre et un piston qui transmet son mouvement au vilebrequin par une bielle. Le déplaceur se meut dans son cylindre sous l'action des variations de pression qui agissent sur lui. La technologie des moteurs à pistons libres est explicitée dans le rapport Walker et associés (1985).

---

* Voir bibliographie en dernière page.

Les moteurs de ce type ont été inventés à l'Université de Calgary en 1970, voir Walker 1973. Ils ont été appelés moteur Stirling hybride. Leur intérêt réside principalement dans la possibilité qu'ils offrent de convertir les moteurs diesel en moteurs à cycle de Stirling. Lorsque, plus tard, le brevet obtenu en 1907 par Ossian Ringbom a été rendu public, les moteurs Stirling à course libre ont été appelés moteurs Ringbom-Stirling.

La recherche documentaire sur les moteurs de type Ringbom-Stirling n'a mis en lumière que peu de travaux antérieurs dans ce domaine; toutefois, elle a révélé l'existence d'un prototype de 1 HP réalisé en 1980-1981 par la compagnie Sunpower Inc. d'Athens (Ohio) et financé par un des puissants constructeurs de moteurs aux États-Unis. La Sunpower se spécialise dans la recherche et le développement de systèmes fondés sur le principe du moteur Stirling à course libre. Bien que ce prototype ait fonctionné, son développement a été arrêté par le promoteur qui le considérait comme inapte à une production en série.

Un des chercheurs qui faisaient partie de l'équipe mise sur pied par la Sunpower était le Dr J. Senft, maintenant professeur à l'Université du Wisconsin. Il a été engagé à titre de consultant pour le programme de recherche sur le moteur Ringbom-Stirling lancé par le Centre de développement des transports (CDT) et l'Université de Calgary. Son rapport, Senft 1981a, et les publications qui suivirent, Senft 1981b et Senft 1983, ont jeté les bases théoriques du moteur Ringbom-Stirling.

À l'issue d'un examen attentif des moteurs diesel sur le marché, le moteur Lister 8/1, un monocylindre lent, a été sélectionné aux fins de conversion. Les études de conversion de ce moteur sont décrites en détail dans le rapport Walker 1981b.

La réalisation d'un moteur Ringbom-Stirling utilisant certains éléments du moteur Lister et celle d'un banc d'essai convenablement instrumenté ont été prises en charge par l'Université de Calgary qui a réservé à ce moteur un local exprès quoique provisoire. Les travaux de mise au point et d'essais ont commencé peu après.

Pour amener ce moteur au stade opérationnel, il a fallu consentir d'importants efforts de mise au point, suivis d'un programme de marche qui a duré une vingtaine d'heures et durant lequel les pressions et les vitesses ont été progressivement augmentées. La puissance maximale nette enregistrée a été de 1,85 kW à une pression moyenne de 2,5 MPa (371 lb/po^2) et une vitesse de 6,9 Hz (424 tours par

minute). Étant donné qu'il aurait été dangereux de pousser plus loin les pressions et les vitesses dans le local provisoire fourni par l'université, il a été décidé d'arrêter les essais avant de parvenir aux conditions de fonctionnement et à la puissance nominale visées.

L'alésage et la course du prototype sont les mêmes que pour le moteur diesel original, mais il utilise l'air comme fluide de travail et l'eau comme lubrifiant. Mis en marche, ce moteur expérimental a développé un excédent de puissance à l'arbre. Toutefois, il est nécessaire que de plus amples travaux soient entrepris; ces travaux, estimés être de nature plus technique que scientifique, devraient avoir lieu dans une installation convenablement équipée, notamment d'un banc d'essai dynamique.

Ils devraient viser à: augmenter la puissance nette par un accroissement des pressions et des vitesses; améliorer en les simplifiant les systèmes de commande du moteur et de contrôle de la combustion; rechercher de nouveaux revêtements anti-corrosion et, enfin, optimiser les caractéristiques et le fonctionnement des organes de lubrification, d'étanchéité et d'appui.

Cette tâche a été menée à bien, malgré les restrictions de vitesse et de pression décidées pour des motifs de sécurité. Grâce à ce travail, la théorie fondamentale du moteur Ringbom-Stirling a pu être poussée plus loin et validée expérimentalement, notamment en ce qui concerne les mouvements du déplaceur. En effet, un modèle réduit de ce moteur réalisé en dehors du programme de recherche, ainsi qu'une série de photographies haute vitesse, ont donné la confirmation que celui-ci se déplaçait effectivement comme l'avait prévu le Dr J. Senft dans son rapport de recherche sur le moteur Ringbom-Stirling.

Un modèle de simulation, fonctionnant sur ordinateur et élaboré dans le cadre du programme de recherche, a permis d'asseoir la conception de moteurs de ce type sur des assises rationnelles.

Enfin, le programme de recherche a débouché sur un certain nombre de concepts nouveaux concernant les principaux organes du moteur Stirling, concepts qui trouveront leur réalisation dans des versions ultérieures du moteur.

De janvier à juillet 1983, le chercheur en chef a obtenu de l'Université de Calgary un congé afin d'approfondir la technique des caloducs au sodium et son application au moteur Stirling. Le rapport Walker 1983 rend compte de ces travaux. Bien que ne faisant pas partie du programme dont

il est rendu compte ici, ces travaux constituent un jalon important de la recherche sur le moteur Stirling brûlant du charbon sur lit fluidisé.

En résumé, le moteur expérimental n'a pas encore été soumis à toutes les épreuves nécessaires en vue d'établir ses performances potentielles, les essais poussés aux niveaux caractéristiques de pression et de vitesse ayant été reportés jusqu'à ce que l'université puisse disposer d'installations adéquates ou que le CDT décide d'un autre endroit où pourraient se poursuivre la recherche et le développement de ce moteur.

2. DESCRIPTION DU MOTEUR

2.1 Généralités

L'aspect mécanique du prototype a été étudié bien avant l'élaboration du programme de simulation assistée par ordinateur. Les chercheurs ont utilisé les plus récentes méthodes de calcul pour réaliser des caractéristiques techniques choisies arbitrairement.

Les plans d'ensemble et de détail du moteur ainsi que du banc d'essai ont été dessinés et soumis à l'approbation du CDT. Quant aux dessins techniques de base, ils se trouvent au Département de génie mécanique de l'Université de Calgary.

Le rapport Walker 1981b donne un aperçu complet des considérations ayant présidé à la conception du prototype.

Pour réaliser celui-ci, on a utilisé le vilebrequin, le carter et le volant d'un moteur Lister 8/1 (voir figure 1). Un cylindre Lister a été utilisé comme guide de tête de piston. Avec un alésage de 114,3 mm (4,5 pouces) et une course de 133,35 mm (5,25 pouces), le moteur Lister développe une puissance nominale de 5,9 kW ou 8 HP à 13,33 Hz, soit 800 tours par minute. C'est un moteur de puissance moyenne, de bonne fabrication et servant surtout à des utilisations agricoles. À ce titre, il convenait parfaitement au projet considéré puisqu'il possède plusieurs des caractéristiques d'un moteur pour la traction ferroviaire: ex. régime lent et puissance modérée. Plusieurs éléments du moteur ont été enlevés, tels que la culasse, la pompe à combustible, etc. En revanche, la masse du volant double a été considérablement augmentée.

Le moteur a été complètement démonté afin d'en revêtir les surfaces intérieures de téflon (polytétrafluoréthylène) pour le protéger de la corrosion due à l'eau utilisée comme lubrifiant. Les tourillons ont été revêtus de chrome en vue de les protéger, eux aussi, de la corrosion.

Dans le prototype du moteur Ringbom-Stirling, montré en coupe à la figure 2, le piston diesel a été remplacé par une tête de piston et accouplé au piston de puissance du moteur Stirling par une bielle, l'espace vide au-dessus du piston de puissance faisant office de chambre froide du moteur Stirling.

Cette chambre communique avec un deuxième cylindre renfermant le déplaceur qui est une structure creuse formée d'un dôme et d'une base en acier inoxydable.

Entourant ce deuxième cylindre se trouvent un réchauffeur dans la partie supérieure, un refroidisseur dans la partie inférieure et, entre ces deux parties, un régénérateur formé d'une torsade de fils métalliques fins et bien étanches.

L'espace intérieur au-dessus du déplaceur constitue la chambre chaude et l'espace intérieur au-dessous communique directement avec la chambre froide au-dessus du piston de puissance.

Cette double chambre froide communique avec la chambre chaude par l'entremise de passages dans le refroidisseur, d'espaces vides dans le régénérateur et des tubulures du réchauffeur (voir figure 2).

Le déplaceur est commandé par une tige de diamètre relativement important, à l'extrémité inférieure de laquelle est fixé le piston "phaseur" qui coulisse dans la chambre de rebond. Enfin, des ressorts gazeux de volume variable sont disposés de part et d'autre du piston phaseur.

De faible masse, le déplaceur est commandé par la différence de pression qui existe entre la chambre chaude et la chambre de rebond et qui est appliquée à toute la section de la tige. Quant aux ressorts gazeux, ils assurent la limitation de la course de déplacement et l'inversion sans choc du sens du déplacement.

Le réchauffeur est enfermé dans un dôme calorifugé muni de lumières d'admission et d'échappement. Les gaz produits par la combustion d'un mélange de propane et d'oxygène pénètrent dans le dôme par les lumières d'admission et en ressortent par les lumières d'échappement après avoir réchauffé la tubulure. La combustion se fait par deux brûleurs de type commercial, dans une chambre placée juste à l'amont du dôme.

Dans l'espace au-dessous du piston de puissance, (voir figure 2) appelé chambre tampon, règne une pression équivalant à la pression moyenne du cycle dans la chambre de travail, déchargeant ainsi le mécanisme d'entraînement du moteur. En faisant régner dans la chambre tampon une pression de compensation $\bar{p}$ (pression moyenne du cycle), on ramène le différentiel de pression sur le piston à $(P_{ins} - \bar{p})$ au lieu de $(P_{ins} - p_{at})$ qui aurait été le cas sans cette mise sous pression, P_{ins} étant la pression instantanée dans la chambre de travail et P_{at} la pression atmosphérique.

Dans un moteur Stirling à double effet, cette chambre tampon ferait office de chambre froide d'un deuxième déplaceur, c'est-à-dire d'un deuxième ensemble à cycle de Stirling. Mais, pour des raisons d'économie et aussi pour gagner du temps, le prototype réalisé ne comporte qu'un déplaceur.

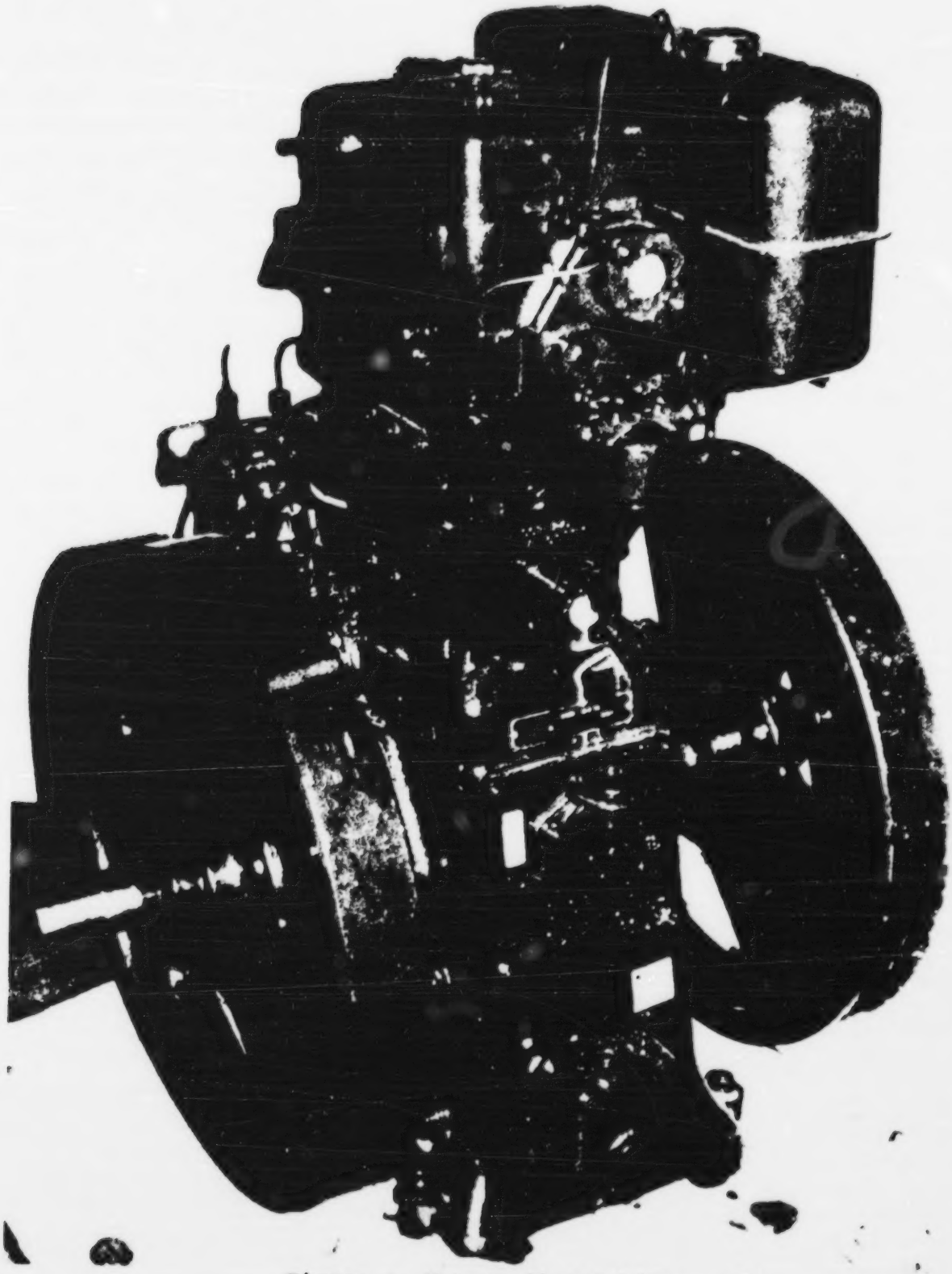

Figure 1 Moteur diesel Lister 8/1

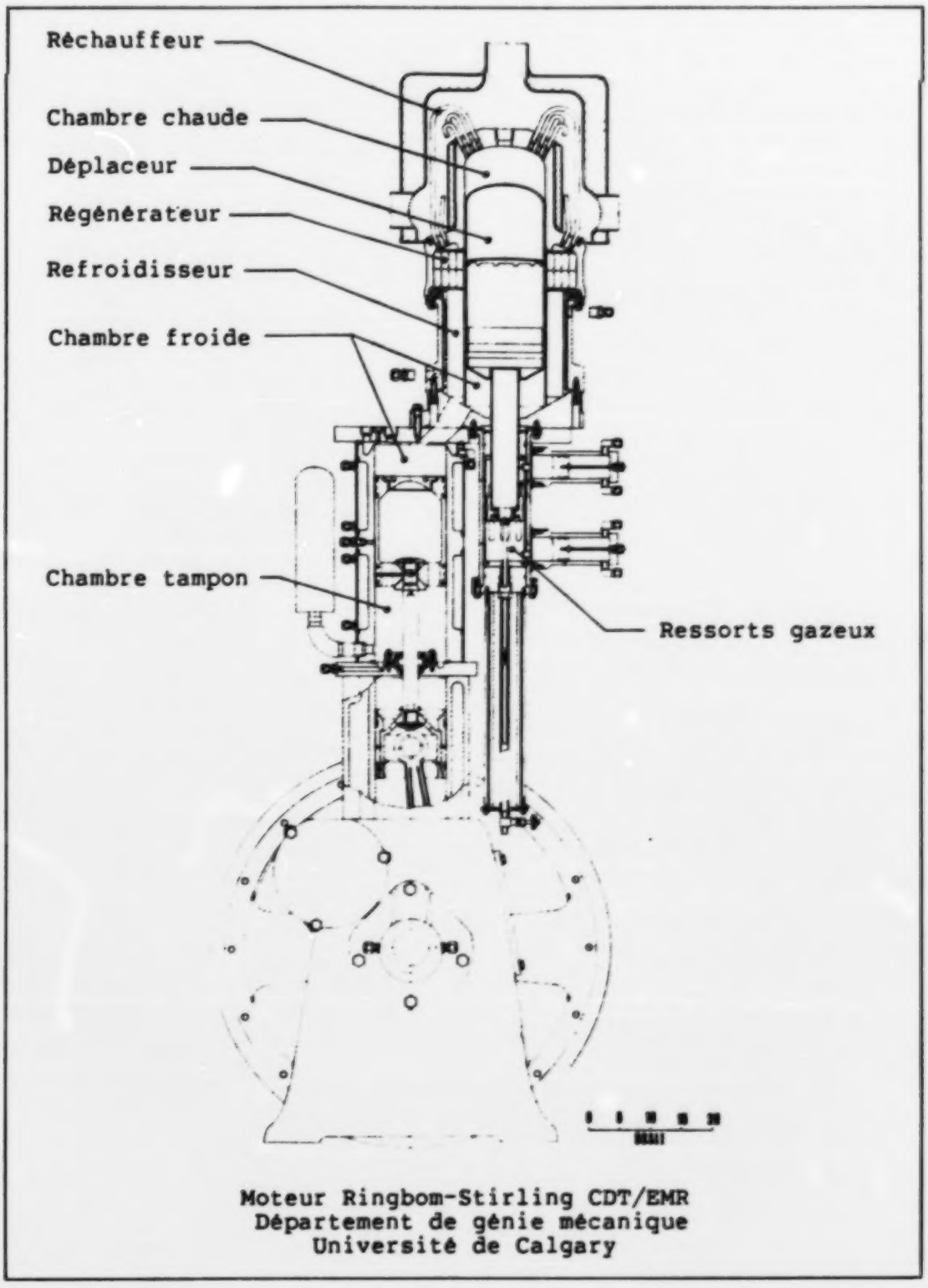

Figure 2 Coupe du moteur Ringbom-Stirling

3. ESSAIS PRÉLIMINAIRES

3.1 Généralités

Le prototype terminé, nous l'avons mis en marche pendant quelques heures dans le but de nous familiariser avec son fonctionnement, de corriger certains défauts et de nous former une opinion sur ses performances éventuelles.

Ces essais préliminaires ont donné lieu à plusieurs modifications, notamment aux ressorts gazeux, au déplaceur, à la base du cylindre du déplaceur et au cylindre du piston de puissance. Ces modifications ont permis d'augmenter la puissance du moteur par accroissement progressif de la température de réchauffage, de la pression moyenne dans la chambre de travail et enfin du régime de marche (tours par minute).

Le moteur doit être soumis à une surveillance étroite de tous ses éléments par un opérateur connaissant son principe de base et versé dans son fonctionnement. Il nécessite également la présence d'une deuxième personne chargée de l'instrumentation ainsi que de la sécurité de la marche.

3.2 Résultats

Les résultats tirés des essais préliminaires sont soit quantitatifs, soit qualitatifs. Pour suivre la progression des essais, il suffit d'en dresser la liste avec, en regard, les valeurs de certains paramètres clés et les observations qui s'imposent. Le tableau 1 récapitule les principaux résultats obtenus.

Le moteur lui-même, le banc d'essai et l'instrumentation ayant été améliorés tout au long des essais, aucune comparaison directe n'est possible entre deux séries d'essais.

Le tableau 1 donne aussi les paramètres clés pris en compte lors des essais ainsi que les autres observations faites, soit: positions du piston et du déplaceur, pression dans la chambre de travail et/ou pression dans les ressorts gazeux. Nous disposons de ces enregistrements à l'égard d'un bon nombre des essais, même si seulement deux observations pouvaient être faites simultanément.

Les données en sortie du programme MACSYM ont été organisées de manière à réaliser un équilibre acceptable entre la quantité d'information présentée et le temps d'affichage disponible.

3.3 Analyse des données

Pour que les valeurs de déplacement du déplaceur correspondent plus ou moins à celles des calculs théoriques, il faut que les variations de pression dans les ressorts gazeux, dues aux variations de volume occasionnées par la tige du déplaceur, restent dans des limites raisonnables.

Le déplaceur est un élément critique, aussi bien dans sa conception que dans sa réalisation. D'une part, une pression doit régner dans l'intérieur creux du déplaceur afin de prévenir l'affaissement et, d'autre part, sa course doit être libre et sa masse réduite au minimum afin de permettre des vitesses de marche modérément élevées et d'en tirer une puissance accrue.

Les essais ont mis en évidence des forces de frottement très élevées dans le mécanisme d'entraînement. Cette détermination a été faite en comparant la puissance à l'arbre résultant d'un essai donné à la puissance théorique tirée du diagramme P-V du cycle. Ainsi, par exemple, au regard de l'essai 2 du 28 mars 1983, on lit une puissance à l'arbre de 1,24 kW alors que le diagramme donne 2 kW. Par ailleurs, d'autres essais au cours desquels seul le vilebrequin était observé donnent des coefficients de frottement mesurés beaucoup plus élevés que prévus.

Les essais ont révélé, en outre, que le réglage de la pression dans les ressorts gazeux est un facteur primordial pour que les déplacements du déplaceur aient l'amplitude voulue, même dans les cas où une bonne correspondance a pu être établie entre régime de marche et pression moyenne du cycle.

Étant donné que, d'après l'équation de Beale, la puissance d'un moteur Stirling croît avec la pression, la vitesse et la différence de température, il s'ensuit que, si la température était gardée constante, la puissance devrait avoir un rapport linéaire avec la vitesse et le différentiel de pression.

Le cas du moteur Ringbom-Stirling est particulier, en ce sens que le déphasage entre le piston et le déplaceur (ou tout autre facteur équivalent, étant donné que le cycle du déplaceur n'a normalement pas la même forme que celui du piston) est fonction de la relation entre vitesses et pressions. Des études paramétriques faites à l'aide du programme de simulation élaboré dans le cadre de cette recherche ont montré que, à une pression donnée, la puissance maximale du moteur s'obtient à un seul régime donné.

Le graphique de la figure 3 a été tracé dans cette optique. Il montre la répartition des puissances obtenues des essais, d'une valeur d'un dixième de kilowatt ou plus. Si tous les essais avaient été faits à la même température, on aurait dû voir un accroissement de la puissance linéairement à la croissance des pressions et des températures. Or, la figure 3 infirme cette hypothèse, et même les corrections faites pour tenir compte des différences de température n'ont pas réussi à la valider. Les chercheurs sont donc arrivés à la conclusion qu'un certain nombre de variables importantes n'avaient pas été prises en ligne de compte.

Dans toute recherche ultérieure, les facteurs devant être pris méticuleusement et méthodiquement en compte devraient être les suivants:

a) Facteurs mécaniques - meilleure compréhension de l'interaction entre les lubrifiants utilisés: solides autolubrifiants et eau. Des expérimentations axées sur cet aspect devraient ouvrir la voie à la conception de paliers améliorés.

b) Dynamique des fluides - les écoulements à l'intérieur du moteur sont complexes. Il s'agit d'examiner de près les nombreuses irréversibilités dans les ressorts gazeux et dans la chambre tampon, afin d'en arriver à une meilleure circulation à l'intérieur du moteur.

c) Optimisation du régénérateur - ce facteur est d'importance, compte tenu des contraintes à prendre en compte, comme la charge due aux pressions internes, l'exécution plus ou moins difficile de cet organe et la diminution des volumes morts.

d) Commande du déplaceur (autre facteur d'importance) - dans un moteur Ringbom-Stirling, ce problème est rendu plus critique par l'aptitude du moteur à varier sa vitesse.

e) Maîtrise des performances - la sensibilité du moteur au mode de fonctionnement et les pertes qui se produisent dès que le moteur s'écarte des conditions nominales de fonctionnement sont autant de sujets de recherche.

Tableau 1 Compilation des résultats, partie 1

COMPILATION DES RÉSULTATS

Date	Essai n°	Numéro consécutif	Tr/min	Pression ch. froide	Pression ch. tampon	Moyenne des températures (°C)	Couple[1]	kW[1]	Position: piston	Position: déplaceur	Pression ch. de travail
20 janv.	1	1	74	0	0	16	0,0	0,00	x	-	x
	2	2	113	0	0	15	-1,3	-0,02	x	-	x
	3	3	178	0	0	15	-1,4	-0,03	x	-	x
	4	4	301	0	0	16	-0,7	-0,03	x	-	x
	5	5	492	0	-1	16	0,0	0,00	x	-	x
	6	6	104	31	5	17	-7,3	-0,11	x	x	x
	7	7	188	33	6	17	-5,1	-0,13	x	x	x
	8	8	297	34	6	18	-4,4	-0,19	x	x	x
	9	9	494	35	7	18	-4,4	-0,31	x	-	x
	10	10	123	83	4	14	-46,1	-0,81	x	x	x
	11	11	182	83	5	12	-30,7	-0,79	x	x	x
	12	12	309	83	5	8	-24,9	-1,09	x	x	x
	13	13	492	86	5	1	-24,2	-1,69	x	x	x
	14	14	478	94	2	-17	-32,2	-2,19	x	x	-
21 janv.	1	15	39	1	-1	17	-6,6	-0,04	x	-	x
	2	16	-	-	-	-	-	-	x	x	x
	3	17	174	35	29	19	-2,2	-0,05	x	x	x
	4	18	301	36	32	20	-1,5	-0,06	x	x	x
	5	19	490	39	38	20	-3,7	-0,25	x	x	x
	6	20	113	65	65	17	-12,4	-0,20	x	x	x

[1] Les valeurs négatives signifient que le moteur est entraîné par un dynamomètre.

COMPILATION DES RÉSULTATS (suite)

Date	Essai n°	Numéro consécutif	Tr/min	Pression ch. froide	Pression ch. tampon	Moyenne des températures (°C)	Couple'	kW'	Position: piston	Position: déplaceur	Pression ch. de travail
	7	21	178	64	67	16	-8,1	-0,20	x	x	x
	8	22	293	64	69	13	-8,1	-0,33	x	x	x
	9	23	492	67	74	8	-13,9	-0,97	x	x	x
	10	24	156	247	256	8	-44,6	-0,99	x	x	x
	11	25	320	253	281	5	-43,9	-3,00	x	x	x
	12	26	500	266	280	-3	-54,9	-3,90	x	x	x
2 févr.	1	27	166	1	1	16	0,7	0,02	x	x	-
	2	28	254	1	-2	15	0,7	0,02	x	x	-
	3	29	256	38	43	13	-5,1	-0,19	x	x	-
	4	30	254	74	86	4	-13,0	-0,48	x	x	-
	5	31	170	82	88	3	-15,0	-0,37	x	x	-
	6	32	164	73	72	9	-11,0	-0,26	x	x	-
	7	33	164	76	75	604	5,5	0,13	x	x	-
4 févr.	1	34	168	51	48	10	-8,5	0,01	x	x	x
	2	35	162	55	48	534	1,5	0,00	x	x	x
	3	36	168	55	48	608	3,8	0,00	x	x	x
2 mars	1	37	160	124	129	6	-23	0,00	-	-	-
	2	38	160	144	151	13	-28	-0,01	-	-	-
	3	39	170	154	151	599	1,08	0,00	-	-	-
28 mars	1	40	326	212	199	554	8,87	0,41		-	

Tableau 1 Compilation des résultats, partie 2

COMPILATION DES RÉSULTATS (suite)

Date	Essai n°	Numéro consécutif	Tr/min	Pression ch. froide	Pression ch. tampon	Moyenne des températures (°C)	Couple'	kW'	Position: piston déplaceur		Pression ch. de travail
	2	41	438	360	340	588	20,0	1,24	x	x	-
29 mars	1	42	352	391	378	455	2,7	0,14	x	x	-
	2	43	410	326	313	568	12,4	0,72	x	x	-
	3	44	479	334	307	607	13,9	0,95	x	x	-
	4	45	514	390	336	605	10,0	0,73	x	x	-
30 mars	1	46	480	367	336	-9	-7,4	-5,06	x	x	-
	2	47	516	181	181	545	3,4	0,25	x	x	-
	3	48	514	374	328	539	9,0	0,66	x	x	-
4 avr.	1	49	430	217	186	-6	-37,5	-2,29	x	x	-
	2	50	365	271	264	571	18,8	0,97	x	x	-
	3	51	438	266	243	603	15,3	0,95	x	x	-
10 mai	1	52	281	247	233	-7	-40,4	-1,61	x	x	-
	2	53	353	271	261	506	18,9	0,95	x	x	-
	3	54	471	345	315	522	16,5	1,10	x	x	-
	4	55	395	417	388	548	23,3	1,31	x	x	-
	5	56	553	490	396	491	2,1	0,17	x	x	-
	6	57	395	400	354	521	13,4	0,75	x	x	-
16 mai	2	58	418	378	350	529	18,4	1,09	-	-	-
	1	59	412	353	313	547	16,0	0,94	x	x	x
17 mai	1	60	410	332	309	610	23,9	1,39	-	-	-
	2	61	424	371	344	660	30,8	1,85	x	x	x

Tableau 1 Compilation des résultats, partie 3

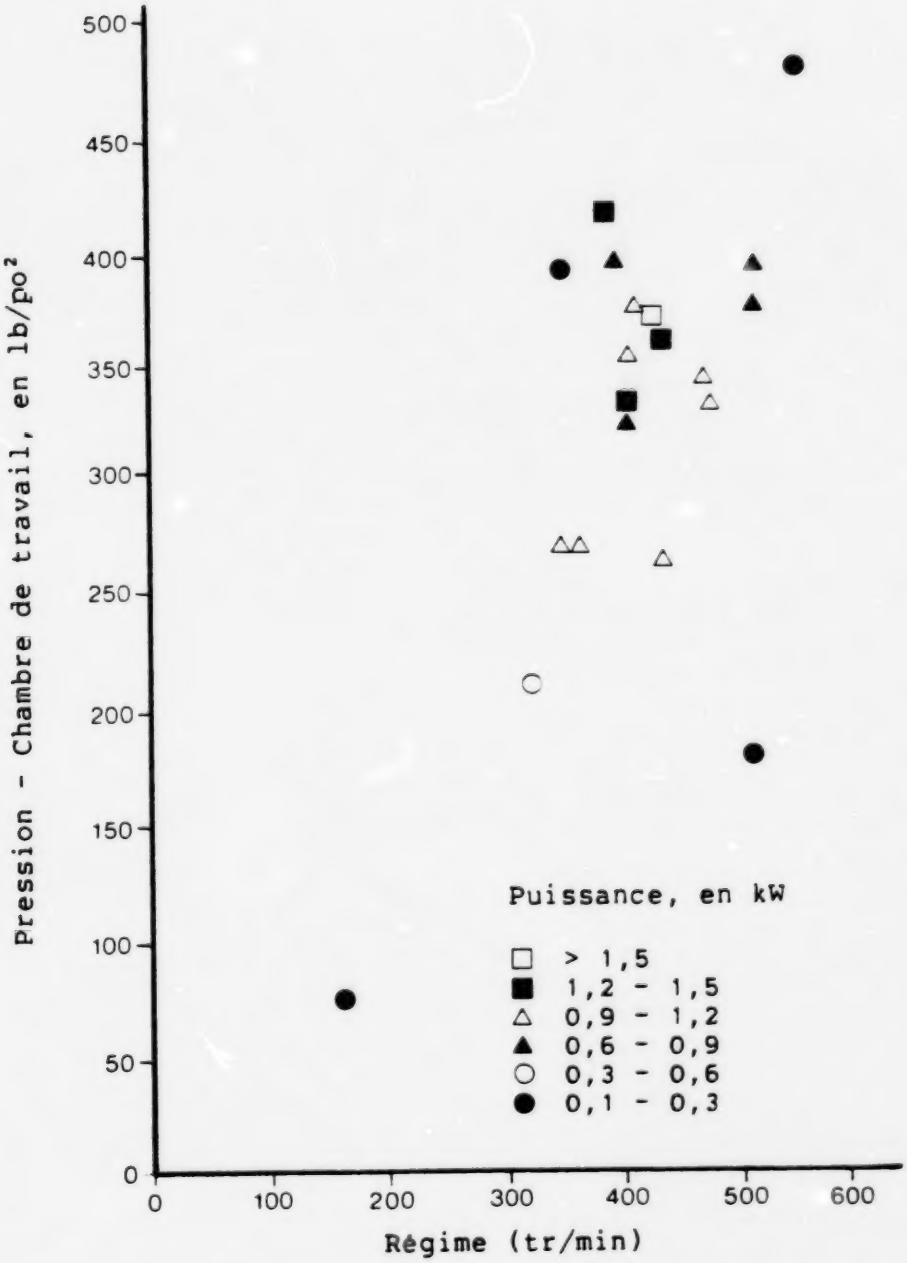

Figure 3 Puissance délivrée en fonction du régime et de la pression moyenne du cycle

4. OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS

La présente étude est une conséquence de l'intérêt renouvelé pour les énergies de substitution, provoqué par l'accroissement fulgurant des prix du pétrole au début des années 70. Le charbon est une de ces énergies dont les pays politiquement stables disposent sous forme d'importants gisements. Dans la décennie qui a suivi, d'immenses efforts ont été consentis, directement ou indirectement, à la recherche sur les moteurs thermiques brûlant du charbon. L'utilisation directe de l'énergie thermique du charbon dans des moteurs à cycle de Rankine ou de Stirling est intéressante du fait qu'elle ne nécessite pas le traitement préalable de ce combustible. En revanche, ce dernier est de manutention plus difficile que le mazout.

À l'époque, on pensait que les utilisations les plus probables des moteurs à cycle de Stirling brûlant du charbon seraient confinées au domaine des puissances élevées où le différentiel de prix et la grande abondance du charbon joueraient en sa faveur et compenseraient les désagréments qu'il entraîne ou le coût de sa manutention. Parmi les utilisations envisagées, mentionnons les moteurs fixes, la traction ferroviaire, la propulsion marine et les gros engins mécaniques utilisés dans les domaines miniers, forestiers, agricoles et du bâtiment, dans la gamme des puissances allant de 0,5 à 5 MW.

L'emploi des moteurs Stirling dans ces applications se justifie d'autant plus qu'on s'est rendu compte que les moteurs diesel de grande puissance sont tous lents et que leur puissance spécifique - puissance à l'arbre par unité de cylindrée - est basse. En effet, alors qu'un moteur diesel animant une voiture privée a une puissance spécifique de 35 à 45 kW par litre de cylindrée (50 à 70 HP à l'arbre par litre), celle-ci tombe à 15 kW, 20 HP, par litre dans le cas des moteurs plus gros (plus de 1000 kW ou 1500 HP) tournant à des vitesses de l'ordre de 16 Hz ou 1000 tr/min. Enfin, les très gros moteurs diesel utilisés pour la propulsion marine, à entraînement direct de l'arbre et tournant à la vitesse de 1,6 Hz ou 100 tr/min ne développent que 1,5 kW, ou 2 HP, par litre.

Dès le début de la recherche sur les moteurs Stirling, on savait que des puissances spécifiques et des vitesses comparables à celles des moteurs diesel de grande puissance étaient réalisables en utilisant l'air comme fluide de travail.

Cependant, dans les années 50, on s'est tourné vers les gaz légers, comme l'hélium et l'hydrogène, parce qu'ils autorisent des puissances spécifiques et des vitesses rendant le moteur Stirling comparable aux moteurs diesel utilisés pour la traction routière. En revanche, ils posent un problème très aigu d'étanchéité, problème qui n'a pas encore reçu de solution satisfaisante après 30 ans de recherche ininterrompue par des ingénieurs et des savants de renom. Malgré toute la technologie existante, on ne sait pas encore comment contenir ces gaz légers mis en oeuvre sous fortes pressions dans un moteur rapide, à l'aide d'étanchéités dynamiques, tout en gardant les pertes à un niveau acceptable et en leur assurant une longue durée de vie utile.

L'air est revenu à l'honneur comme fluide de travail dans les moteurs Stirling de grande puissance parce qu'on s'est aperçu que les gaz légers n'apportaient aucun avantage particulier lorsque les régimes et les puissances spécifiques sont bas, comme c'est le cas en l'occurrence. L'air offre de nombreux avantages: il est omniprésent et peut être renouvelé par un simple petit compresseur mécanique en cas de fuite. De plus, il est plus aisé à contenir que l'hydrogène ou l'hélium et, enfin, il supprime la nécessité d'avoir à portée de main des bouteilles de gaz comprimé pour les remplissages périodiques.

Mais, l'ennui avec l'air, est qu'il donne prise au dangereux phénomène d'auto-allumage, c'est-à-dire l'explosion consécutive à l'infiltration d'huile de lubrification dans l'espace de travail et au mélange de celle-ci avec l'air sous pression dans la tubulure du réchauffeur ou dans tout autre point chaud du moteur. Une seule solution à ce problème: utiliser l'eau au lieu de l'huile comme lubrifiant. Solution d'autant plus réalisable que les conditions de lubrification dans les moteurs Stirling sont beaucoup moins rigoureuses que dans les moteurs diesel. En effet, les variations de pression y sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur à celles des moteurs diesel et la difficulté de lubrifier le segment de feu du piston est simplifiée d'autant. La pénétration de l'eau dans l'espace de travail n'altérera pas le bon fonctionnement du moteur. Elle aura plutôt un effet bénéfique, du fait qu'elle servira à lubrifier les joints d'étanchéité et les segments du piston et que ces étanchéités deviendront alors du type hydraulique et non plus pneumatique, réduisant encore plus les fuites d'air, comparativement à celles des gaz légers.

La recherche sur un moteur à fluide de travail diphasique, air et eau par exemple, a débouché sur la découverte que l'injection d'eau dans la chambre chaude permettrait

d'accroître la puissance spécifique du moteur durant les accélérations et lors des appels de puissance.

Dans la perspective d'une pénurie de pétrole, il a semblé utile d'envisager la conversion de moteurs diesel en moteurs Stirling, possibilité d'autant plus concevable que ces derniers se prêtent étonnamment bien à diverses variantes; quelques-unes ont été étudiées par Walker (1981a), notamment dans l'optique de la conversion du moteur diesel MLW série 251-C à 16 cylindres en V, développant 3000 HP. La plupart de ces variantes supposaient la mise en oeuvre de deux cylindres pour former un système Stirling, l'un destiné au piston de puissance, l'autre au déplaceur. Mais pour obtenir la même puissance qu'auparavant, il aurait fallu doubler la puissance des huit pistons de puissance, ce qui paraissait excessif. Une solution élégante a été d'ajouter au moteur un nombre de cylindres destinés aux déplaceurs, chaque déplaceur étant alors accouplé thermodynamiquement à des pistons de puissance de même phase que lui. En principe, ce moteur, une fois converti et mis en place, aurait développé la même puissance qu'auparavant. Pour obvier à la nécessité d'un mécanisme d'entraînement des déplaceurs, on a adopté la variante à déplaceur à course libre et à piston de puissance commandé, préconisée par Ossian Ringbom en 1907. Des moteurs à échelle réduite ont été réalisés selon ce principe et ont bien fonctionné, permettant de croire à la réalisation possible de moteurs en vraie grandeur.

Tous ces travaux étaient fondés sur l'utilisation d'un piston diesel comme piston de puissance du moteur Stirling. Cela nécessitait des étanchéités capables de résister à la différence de pression entre la chambre de travail et le carter. Celui-ci était soumis à la pression atmosphérique, car il n'était tout simplement pas possible de mettre le carter d'un moteur diesel de l'époque à une pression quelconque.

L'analyse de cette variante a fait ressortir de très fortes charges qui agissent sur le mécanisme d'entraînement, provoquant des pertes de frottement excessives et condamnant la lubrification par eau comme étant quasiment irréalisable.

Pour résoudre ce problème, on a pensé à surmonter le piston diesel d'un ensemble piston de puissance-bielle se déplaçant dans une chambre tampon fermée, où régnerait une pression équivalant à la pression minimale du cycle, ce qui a donné lieu au concept du piston équilibré (voir figure 2). On pourrait aller plus loin en utilisant la chambre tampon comme chambre froide d'un deuxième moteur Stirling, décalé de 180° par rapport au premier. Qui plus est, il sera

possible de donner au deuxième piston un diamètre plus grand de manière à obtenir un rapport alésage-course plus élevé, caractéristique recherchée dans les moteurs Stirling pour réduire les pertes thermiques au minimum.

On donne aux moteurs diesel lents un faible rapport alésage-course dans le but de faciliter la distribution et la combustion du combustible pulvérisé. À titre d'exemple, le moteur Lister utilisé dans cette recherche; son alésage était de 114,3 mm (4,5 pouces) et sa course de 133,25 mm (5,25 pouces). On est loin du rapport 3:1 que l'on croit quasi optimal pour un moteur Stirling. Ce deuxième piston de puissance surmontant le piston diesel à longue course donne inévitablement au moteur une longueur démesurée, comme illustrée à la figure 2. Il serait bien sûr possible de donner au déplaceur une position horizontale, mais alors il faudrait tenir compte du facteur de la pesanteur sur le comportement du déplaceur. D'ailleurs, un des principes fondamentaux du moteur Stirling à course libre est de privilégier une disposition verticale des cylindres dans la mesure du possible (Walker et Senft, 1985).

Le grand inconvénient d'ajouter le piston de puissance au moteur diesel MLW série 251-C pris comme référence est que celui-ci ne pourra sans doute plus être logé dans le compartiment moteur de la locomotive.

Nonobstant, il a été décidé de procéder à la validation du principe de ce moteur et, en outre, de donner au piston de puissance le même diamètre que celui du piston diesel, malgré l'avantage évident d'un diamètre plus grand. Dans un moteur multicylindrique, toute augmentation de l'alésage est conditionnée par le facteur d'écartement entre les cylindres tandis que, dans un moteur monocylindrique, les facteurs limitatifs sont les contraintes, l'équilibrage et la lubrification. La cylindrée effective croît selon le carré de l'alésage, tandis que les contraintes circonférentielles et les pertes thermiques axiales par conduction croissent linéairement avec lui. Il devient donc plus avantageux d'augmenter l'alésage pour se rapprocher autant que faire se peut du rapport alésage-course optimal de 3:1.

Tout au long des étapes de conception, fabrication et assemblage du prototype, une réflexion intense se faisait sur les moteurs Ringbom-Stirling, sur la conversion du moteur Lister et, généralement parlant, sur le domaine plus large des gros moteurs Stirling brûlant du charbon.

Cette réflexion a débouché sur un résultat important: le principe Senft sur le fonctionnement du moteur Ringbom-Stirling (Senft, 1981). Pour la première fois, grâce à ce

principe, il a été possible de prévoir les mouvements du déplaceur à course libre et, plus important encore, de définir la fréquence à partir de laquelle le déplaceur fonctionnant selon le cycle "commandé" cesse d'être animé d'un mouvement saccadé et adopte un mouvement sinusoïdal, fréquence que l'on pense correspondre à la fréquence de fonctionnement maximal du Ringbom-Stirling.

Peu après, un programme informatique de simulation a été élaboré (Srinivasan, 1982), qui a permis d'analyser l'effet des principaux paramètres régissant le fonctionnement du moteur. Bien qu'il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine, l'importance de la masse du déplaceur a d'ores et déjà été mise en évidence. La réétude du déplaceur dans le sens de la réduction de sa masse visant une puissance spécifique fixée arbitrairement à 17 HP par litre de cylindrée a mené à un déplaceur structurellement affaibli.

Une des conséquences de cet aspect particulier du programme a été de déboucher sur des configurations de déplaceur à la fois meilleures et novatrices, Walker 1983.

Le démarrage et la régulation du moteur ont causé bien des déboires d'ordre pratique. Lorsque le petit prototype était accouplé à un électrodynamomètre, le démarrage se faisait assez aisément, celui-ci fournissant l'énergie nécessaire. Toutefois, le problème sera tout autre quand il s'agira de démarrer un moteur puissant soumis à la pression du cycle. Au banc d'essai, la régulation par réglage du degré d'élasticité des ressorts gazeux s'est révélée décevante. Pour résoudre ce problème, on a pensé recourir à l'idée émise par William Martini (Walker 1980) selon laquelle un moteur séparé servirait à entraîner le déplaceur, en l'occurrence un petit moteur courant continu à vitesse variable, obtenant ainsi une nouvelle forme de moteur appelée moteur Martini-Ringbom-Stirling ou Fauvel-Stirling. Le va-et-vient du déplaceur engendre des variations de pression qui agissent sur le piston, le mettant en mouvement dans le cylindre et, de la sorte, démarrant le moteur. La puissance requise pour lancer le déplaceur est très faible étant donné qu'il n'existe aucune différence de pression de part et d'autre, à part la chute de pression dans les échangeurs de chaleur.

Pour accroître la vitesse du moteur, il suffit d'accroître la vitesse d'entraînement du déplaceur, ce qui exige une puissance croissant selon le carré de la vitesse. Afin d'obtenir les puissances relativement élevées nécessaires en vue d'entraîner le déplaceur, on peut compter, à mesure que la vitesse augmente, sur un ressort gazeux de type Ringbom et une tige de déplaceur de fort diamètre.

Si on met le ressort gazeux à une pression donnée, on constate que le déplaceur se meut plus comme un déplaceur à course libre type Ringbom que comme un déplaceur relié à un entraînement de type Martini. L'énergie nécessaire aux déplacements du déplaceur provient de la source de chaleur intense alimentant le moteur.

Une équation simplifiée de la puissance développée par un moteur Stirling est due à William Beale (Walker 1980):

$$P = 0{,}015\ \bar{p}Vf$$

où

P puissance délivrée (watts)
$\bar{p}$ pression moyenne du cycle (bar)
V déplacement du piston de puissance (cm^3)
f fréquence (Hz)

On constate que le déplacement du piston de puissance constitue un facteur déterminant de cette équation. Il est donc étonnant de constater dans les moteurs Stirling de conception classique le peu d'attention accordée à ce facteur, comparativement à d'autres tels que: mécanisme d'entraînement, engrenage, dôme du déplaceur et chambre de combustion.

Se démarquant des autres chercheurs, E.R. Bingham a imaginé un moteur doté de pistons de très grand diamètre, traversés dans leur axe transversal par le vilebrequin du moteur, celui-ci étant entraîné par les pistons au moyen de mécanismes dérivés de la manivelle à coulisse. Cette configuration autorise un fort déplacement du piston, ce qui permet de réduire soit la pression moyenne, soit la vitesse du moteur, comme le veut l'équation de Beale.

Une variante comporte des pistons Bingham, un déplaceur creux Kentfield et un entraînement de déplaceur type Fauvel. Décrit par Walker et associés en 1984, ce moteur fait l'objet de recherches poussées. Une autre variante, comportant également des pistons Bingham, est dérivée du moteur Siemens-Stirling, où la chambre froide d'un cylindre communique avec la chambre chaude d'un autre cylindre, à travers le refroidisseur, le régénérateur et le réchauffeur. Le nombre d'éléments mobiles par moteur est de la sorte ramené de deux à un. Quant aux cylindres, leur nombre peut varier de trois à six. Ce moteur fait également l'objet d'une recherche intense.

En revanche, peu de recherche a été faite sur la chambre de combustion et les moyens de transmission de la chaleur dans les gros moteurs Stirling alimentés en charbon.

Une idée séduisante serait d'utiliser la combustion en lit fluidisé en association avec un caloduc au sodium. Le foyer à lit fluidisé, associant le charbon à de la chaux, peut brûler du charbon de qualité médiocre ayant une teneur élevée en soufre, avec très peu ou pas d'émissions toxiques. Il peut fonctionner à une température avoisinant les 800°C et autoriser des transferts thermiques singulièrement élevés.

L'idée du caloduc au sodium appliqué au moteur Stirling est avantageuse à plusieurs titres. Elle autorise une grande souplesse géométrique dans l'agencement du lit fluidisé et du moteur. Un caloduc d'au plus 5 mètres de long peut transmettre des puissances thermiques élevées avec un faible écart de température. Enfin, il transporte des densités de flux qui sont de plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles transportées par simple conduction thermique, dans des barres de cuivre ou d'argent extrêmement pur.

Les flux thermiques réalisés durant les phases évaporation et condensation du sodium sont très élevés, ce qui permet un encombrement réduit du réchauffeur, tant en diamètre qu'en longueur. À leur tour, les volumes morts dans le moteur sont réduits, apportant une augmentation correspondante de la puissance délivrée. L'isothermicité du système est telle qu'aucun point chaud ne se produit dans les tubes du réchauffeur. Ainsi, la température moyenne du réchauffeur coïncide avec la température maximum du système et elle peut être amenée assez près de la limite de résistance thermique du matériau avec des conséquences heureuses sur le rendement et la puissance du moteur.

Dans la pratique, un caloduc à deux étages serait utilisé. Un ensemble de caloducs formant le premier étage transmet la chaleur du lit fluidisé au caloduc au sodium du second étage, par l'intermédiaire d'un système de transfert d'énergie chauffé par le sodium du premier étage, lequel est en phase de condensation. Cet agencement est pratique du fait que toute fuite éventuelle de sodium hors du caloduc du premier étage, due à l'intensité de la chaleur dans le lit fluidisé, n'aura pas d'autre conséquence sur le fonctionnement du moteur qu'une réduction temporaire du régime de marche.

Pour le second étage, un caloduc à conductivité variable assurera l'autorégulation nécessaire de la température et fera office de puits thermique en cas d'arrêt intempestif ou

de grippage du moteur. Walker (1983) a décrit un certain nombre d'utilisations du caloduc au sodium appliquées au moteur Stirling, y compris la conception d'une unité probatoire destinée à la validation du prototype de moteur Stirling.

Une autre technique de chauffe envisagée est celle de la grille mécanique à chaîne associée au transfert direct de la chaleur par convection et rayonnement. Cette méthode fait appel à un bain d'aluminium en fusion faisant office de concentrateur de flux thermique, absorbant la chaleur émanant d'un milieu à flux thermique faible mais à grande surface pour la restituer à un autre milieu sous forme de flux thermique élevé et concentré, à température constante, c'est-à-dire le réchauffeur.

La mise en service récente de six minéraliers australiens fonctionnant au charbon sans surveillance directe porte à croire que, pour ce qui est des moteurs de forte puissance, il n'existe aucun obstacle technique, ou si peu, à l'utilisation directe du charbon comme combustible.

Grâce à une rationalisation de l'économie et à des mesures draconniennes d'économie d'énergie, les importateurs de pétrole ont pu se relever de la conjoncture de crise, au point que l'on connaît maintenant une situation de surplus. Mais cela ne durera qu'un temps. À long terme, on prévoit que le charbon redeviendra un des principaux combustibles, ce qui ouvrira la voie à l'utilisation des moteurs Stirling brûlant du charbon, dans des applications de plus en plus nombreuses et variées.

La Chine, qui dispose d'importants gisements charbonniers, mais où le pétrole est moins répandu, a consenti d'immenses efforts pour que l'industrialisation du pays se fonde plus sur le charbon que sur les ressources pétrolières. À cette fin, plusieurs groupes de recherche et de développement scientifique et technique y ont été créés à l'Institut de recherche sur la propulsion marine au diesel de Shanghai, à l'Institut de génie thermophysique à Pékin et à l'Institut de transport maritime dans l'agglomération de Wuhan. Nul doute que le développement du moteur Stirling brûlant du charbon bénéficiera grandement de tous ces efforts.

D'importants programmes sur le moteur Stirling ont été mis sur pied un peu partout dans le monde: le Japon, la Suède, l'Allemagne, les Pays-Bas, la Grande-Bretagne, l'Italie et la France ont lancé des actions à long terme dans de sens. L'URSS s'y intéresse à fond, tandis qu'aux États-Unis des recherches se poursuivent à plus petite échelle.

5. BIBLIOGRAPHIE

Senft, J. (1981a), Parameter Effects in Hybrid Stirling Engines, Consultant Report, Université de Calgary, Département de génie mécanique.

Senft, J. (1981b), The Hybrid Stirling Engine, Proc. 16th Inter. Soc. Energy Conversion Conf., Atlanta, Géorgie, août.

Senft, J. (1983), First Order Analysis of Ringbom-Stirling Engines, Proc. 18th Inter. Soc. Energy Conversion Eng. Conf., Orlando, Floride.

Walker, G. (1973), Stirling Cycle Machines, Oxford University Press, Oxford.

Walker, G. (1980), Stirling Engines, Oxford University Press, Oxford, 550 p.

Walker, G. (1981a), The Stirling Engine for Railway Locomotive Application, Transports Canada, Centre de développement des transports, Montréal, Québec, TP 2930E.

Walker, G. (1981b), Phase 1 Design Report, Ringbom-Stirling Engine, Transports Canada, Centre de développement des transports, Montréal, Québec.

Walker, G., Fauvel, R., Srinivasan, V., Gustafson, R., van Benthem, J. (1982), Future Coal-Burning Stirling Engines, Proc. I. Mech. Eng., vol. 197, No 46, Londres (tiré à part des actes de la conférence: Stirling Engines, Progress to Reality, Inst. of Mech. Eng., Londres, University of Reading, Grande-Bretagne, mars-avril 1982).

Walker, G. (1983), Sodium Heat Pipe Design for Stirling Engines, Transports Canada, Centre de développement des transports, Montréal, Québec, TP 4843E.

Walker, G., Senft, J. (1985), Free-piston Stirling Engines, Springer-Verlag, Berlin, République fédérale d'Allemagne.